

계절별 기상조건에 따른 사고시나리오 모델링 발전방안 - 염소 누출사고를 중심으로 -

김현섭¹, 전병한^{2*}

¹시흥화학재난합동방재센터, ²고형폐기연구소

Development Plan of Accident Scenario Modeling Based on Seasonal Weather Conditions - Focus on Chlorine Leakage Accident -

Hyun-Sub Kim¹, Byeong-Han Jeon^{2*}

¹Siheung Joint Inter-agency Chemical Emergency Preparedness Center

²Solid & Hazardous Waste Treatment Lab.

요약 본 연구에서는 여러 사업장에서 많이 사용되는 대표적 독성 물질인 염소를 누출 물질로 선정하여 화학사고 통계자료에 따라 사고 발생 빈도가 높은 여름철 기상조건을 인자로 한 대안의 시나리오와 기존의 시행방법인 연평균 기상조건을 인자로 한 대안의 시나리오 비교분석을 통해 개선방안을 제시하고자 하였다. 2014년 1월부터 2016년 12월까지 발생한 총 296건의 화학 사고를 분석한 결과 사계절 중 여름에 가장 많은 사고가 발생하는 것으로 조사되었으며 전체 사고 발생건수의 35.81%를 차지하였다. 실제 염소를 취급하는 사업장을 대상으로 위험성 평가 결과 2016년의 경우 연평균 기상조건하에서 산출된 영향범위는 발생원으로부터 반경 712.4 m, 영향범위 내 주민 수는 20,090 명이었으며, 여름철 평균 기상조건하에서 산출된 영향범위는 발생원으로부터 반경 796.2 m, 영향범위 내 주민 수는 27,143 명으로 나타났다. 이와 같은 결과는 특정 조건하에서 현 대안의 시나리오 상의 영향범위가 포괄할 수 없는 부분이 존재함을 의미한다. 따라서 화학 물질별 특성을 고려한 Case Risk Assessment가 이루어져야 한다는 위험성 평가 제도의 발전방향을 제시한다.

Abstract In this study, we selected chlorine, a typical toxic material used in many workplaces, as the leakagematerial, and through the analysis of alternative scenarios based on the meteorological conditions in the summer frequently encountered in accidents, we suggest ways to improve the (method of analysis/accident scenario modeling). The analysis of 296 chemical accidents from January 2014 to December 2016 found that the highest rate of occurrence was in summer, accounting for 35.81% of the total. According to the risk assessment, the influence range and number of inhabitants in the influence area were 712.4 m and 20,090 under the annual mean weather conditions and 796.2 m and 27,143 people under the summer mean weather conditions, respectively. This result implies that, under certain conditions, the range of impacts in the current alternative scenario is incomplete. Therefore, risk assessment systems need to be improved in order to take into consideration the characteristics of each chemical substance.

Keywords : Accident scenario, Alternative scenario, Chemical accident statistics, Chemical control act, Risk assessment

1. 서론

유해화학물질을 취급하는 사업장은 항상 누출·폭발·

화재 등의 화학사고가 발생할 위험이 크다. 화학사고는 단 한 번의 사고만으로도 중대한 인명사고와 막대한 경제적 손실을 초래할 뿐 아니라 주변 환경을 오염시키거

*Corresponding Author : Byeong-Han Jeon(Solid & Hazardous Waste Treatment Lab.)

Tel: +82-70-7664-2121 email: orange310624@daum.net

Received August 24, 2017

Revised (1st September 14, 2017, 2nd September 29, 2017, 3rd October 12, 2017)

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

나 지역주민들의 건강에 해를 줄 수 있다.

2015년 1월 1일부터 시행된 화학물질관리법 제23조에 따르면 유해화학물질 취급시설을 설치·운영하려는 자는 사전에 화학사고 발생으로 사업장 주변 지역의 사람이나 환경 등에 미치는 영향을 평가한 유해화학물질 화학사고 장외영향평가서를 작성하여 환경부장관에게 제출하여야 한다[1]. 장외영향평가의 도입배경은 취급시설의 설계·설치단계에서부터 사업장 외부영향을 고려하여 취급시설이 안전하게 설계·설치되도록 유도하고 위험도에 따라 안전성을 확보하기 위한 장치마련 필요성을 제기하려는 것이다[2].

화학물질관리법 제23조, 동법 시행규칙 제19조에는 장외영향평가서의 작성 제출 및 검토 등에 필요한 사항을 위해 장외영향평가서 작성 등에 관한 규정을 두고 있다. 이 규정에서 사고시나리오란 화재, 폭발 및 유출, 누출 사고로 인한 영향범위가 사업장 외부에 미치거나 사업장 외부까지 영향은 미치지 않으나 근로자에게 심각한 영향을 줄 수 있는 사고를 말하며, 대안의 사고시나리오는 최악의 사고시나리오보다 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까지 미치는 경우의 사고시나리오 중에서 영향범위가 최대인 경우의 시나리오로 정의하고 있다. 또한 해당지역의 최근 1년간 월별 평균 기온, 평균 습도, 주 풍향, 평균 풍속 등의 기상정보와 대기안정도, 지표면의 굴곡도 등을 사용하여 작성하도록 하고 있다.

2012년 구미 불산 누출사고는 국민들로 하여금 화학사고에 대한 경각심을 불러 일으켰고, 이후 화학사고에 대한 국민들의 민감도는 높아졌다[3]. 이에 따라 화학사고에 대한 신고건수가 급격하게 증가하였으며 보다 정확한 통계수치들이 보고되고 있다[4-5]. 2013년 이후 통계자료에 따르면 월별 화학물질 사고 현황에서 여름철의 화학사고 빈도는 높게 나타나고 있다. 이는 여름철 기후의 영향으로 화학물질의 반응성 변화, 휴가기간 동안의 관리 부주의 및 지역별 특성에 따른 공단지역의 유지·설비비수(shut down) 등이 원인으로 조사되고 있다.

연구에서는 여러 산업, 공업단지뿐만 아니라 정수처리 시설에서도 많이 사용되는 대표적인 독성물질 중 하

나인 염소를 누출물질로 선정하여 모델링을 하였다. 화학사고 통계자료에 따라 사고발생빈도가 높은 여름철 기상조건을 인자로 한 대안의 사고시나리오와 기존의 방식인 연평균 기상조건에 따른 대안의 사고시나리오의 영향범위를 비교함으로써 현실적으로 발생 가능성이 높은 유의미한 시나리오 분석을 하여 현 제도의 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 화학사고 발생 통계

화학안전정보공유시스템(www.csc.me.go.kr)의 자료를 바탕으로 2014년 1월부터 2016년 12월까지 발생한 모든 유형의 화학사고를 분석하였다. 2014년 1월부터 2016년 12월까지 발생한 화학사고는 총 296건이었으며 월별 합산 수치를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 296건의 화학사고를 계절별로 분석한 결과 봄(3월, 4월, 5월)에 80건이 발생하였으며 전체의 27.03%를 차지하였다. 가을(9월, 10월, 11월)에는 59건 발생하여 19.93%를 차지하였으며 겨울(1월, 2월, 12월)에는 51건 발생하여 17.23%를 차지하였다. 여름(6월, 7월, 8월)에 가장 많은 수치인 106건이 발생하였고, 전체의 35.81%를 차지함으로써 여름철이 화학사고 발생비율이 높은 것으로 조사되었다. 이와 같은 특징을 나타내는 이유로는 여름철 기후 조건에 따른 화학물질의 반응성 변화와 작업자의 부주의 및 유지보수기간 등의 원인이 있다.

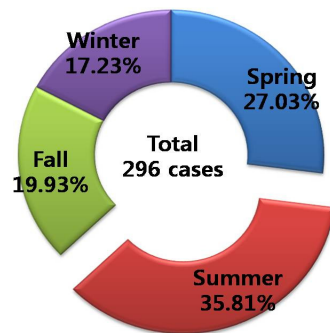


Fig. 1. Seasonal chemical accident occurrence ratio.

Table 1. Monthly chemical accidents that occurred between 2014 and 2016.

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Accidents	18	19	27	30	23	23	45	38	22	22	15	14	296

2.2 사고시나리오 모델링 방법론

모델링 프로그램(KORA)에서 임의의 사고지점은 여타 염소 취급사업장과 다르게 주거지역과 인접해 있어 화학사고 시 인적·물적 피해가 크게 나타날 수 있는 인천광역시 한 정수처리장으로 선정하였으며, 기상조건에 따른 시나리오별 끝점(ERPG-2)을 비교분석하기 위하여 설정한 운전조건은 ‘사고시나리오 선정에 관한 기술지침’(화학물질안전원) 대안의 사고시나리오 및 사고시나리오 분석에 따르며 누출공의 크기는 ‘누출원 모델링에 관한 기술지침’(KOSHA Guide P-92-2012)에 따라 설정하였다[6,7]. 누출시간은 ‘API 581 지침’의 검출 및 차단시스템의 등급결정표에 따라 선정하였다[8].

2.3 기상조건

연평균 기상조건과 여름철(6월, 7월, 8월) 평균 기상조건 차이에 따른 끝점 비교를 위해서 기상자료로 인천의 2016년 기상청 통계자료를 사용하였다. 모델링에 필요한 기상자료는 기온, 습도, 풍향 및 풍속이며, 대기안정도는 장외영향평가 사고시나리오 조건인 D를 기준으로 분석을 하였다. Table 2 는 2016년 인천의 연평균 기상자료이며 Table 3 은 2016년 인천의 여름철 평균 기상자료이다.

Table 2. Annual average weather data of Incheon in 2016.

Month	T(°C)	H(%)	WD	WS (m/s)
1	-2.2	67	N	3.5
2	0.9	66	NNW	3.7
3	6.4	71	NNW	3.3
4	12.7	75	SW	3.1
5	18.3	76	SW	3.2
6	22.1	88	WSW	2.6
7	25.2	94	WSW	2.7
8	27.4	86	NNW	2.7
9	22.9	85	NNW	2.4
10	16.2	75	N	3.1
11	7.4	61	N	3.4
12	2.2	63	N	3.4
Mean	13.3	75	N	3.1

T : temperature H : humidity
 WD : wind direction WS : wind speed

Table 3. Summer weather data of Incheon in 2016.

Summer (6-8 month)			
T (°C)	H (%)	WD	WS (m/s)
24.9	89.3	WSW	2.7

T : temperature H : humidity
 WD : wind direction WS : wind speed

2.4 사고시나리오 운전조건

사고시나리오에서 ERPG-2 농도에 해당하는 거리를 끝점으로 설정하여 염소의 누출로 인한 독성평가를 하였다. 실제 사업장과 유사한 운전조건을 적용하기 위하여 인천광역시에 위치하는 염소 취급사업장 ‘A’사업장의 운전조건을 사고 시나리오에 적용하였다. 염소는 vessel에 액화상태로 보관되며, 저장량은 20 ton, 운전온도는 17.7 °C, 운전압력은 0.6 Mpa을 적용하였다. 화학사고는 ‘사고시나리오 선정에 관한 기술지침’에 근거하여 저장탱크와 연결된 배관의 파열로 염소가 누출되어 10분 간 전량 방출된 것으로 가정하였다. Table 4는 사고시나리오에 적용된 운전조건이다.

Table 4. Operating Condition of Accident point.

Classification	Contents
Chemical	Chlorine
Storage mass	20 ton
Pressure(gage)	0.6 Mpa
Temperature	17.7 °C
Leak hole size	25 mm
Leak duration time	10 min
End-point	ERPG-2 (3 ppm)

3. 결과 및 고찰

여름철 기상조건에 의한 영향으로 화학물질의 반응성 변화, 휴가기간 동안의 관리 부주의 및 지역별 특성에 따른 공단지역의 유지·설비보수(shut down) 등으로 야기된 화학사고 통계자료에 근거하여 위험성 평가를 하였으며, 연평균 기상자료와 여름철 평균 기상자료에 따른 사고시나리오 분석을 위해서 영향범위와 영향범위 내 주민수를 비교하였다. Table 5 는 위험성 평가 결과를 나타내고 있으며, Fig. 2 에 위험성 평가 결과에 따른 영향범위를 지도상에 나타내었다.

위험성 평가 결과 2016년의 경우 연평균 기상조건하에서 영향범위는 반경 712.4 m, 영향범위 내 주민 수는 20,090 명이었으며 여름철 평균 기상조건하에서는 영향범위는 반경 796.2 m, 영향범위 내 주민 수는 27,143 명으로 나타났다. 결과 값에서의 차이는 연평균과 여름철 평균의 기후조건에 의해 의함이라고 볼 수 있다. 영향평가 모델링에서 보편적으로 가장 큰 차이를 만드는 변수

Table 5. Risk assessment modeling results(KORA).

	T (°C)	H (%)	WS (m/s)	AS	End-point (m)	Number of the population within influence range (people)
Annual	13.3	75	3.1	D	712.4	20,090
Summer	24.9	89.3	2.7	D	796.2	27,143

T : temperature H : humidity WS : wind speed AS : atmospheric stability

인 안정도를 두 사고시나리오 모두 D로 고정했음에도 불구하고, 기온과 풍속, 습도 차에 의해 영향범위 반경은 최대 83.8 m, 영향범위 내 주민 수는 최대 7,053 명의 차이를 보이고 있다. SLAB Model의 특성상 이차반응 생성물을 고려하지 않았을 때에도 충분히 유의미한 결과라고 판단하며, 염소뿐만 아니라 다른 반응성이 큰 물질들의 경우에는 상황과 조건에 따라 더 큰 차이를 나타낼 수 있다.

인구 밀집 지역 주변 유해화학물질을 취급하는 사업장의 경우 본 연구의 위험성 평가 결과와 같이 기상조건 변화가 사고시나리오의 영향범위 내 주민 수에 큰 변화를 일으킨다고 할 수 있다. 영향범위 내 주민수의 변화는

인구 밀집 지역에서의 화학사고가 수십, 수 백 미터의 영향범위 차이에도 불구하고 얼마나 많은 주민에게 피해를 입힐 수 있는가를 반증하는 예시라고 할 수 있다. 또한 화학물질관리법 제42조(위해관리계획서의 지역사회 고지)에 따라 사고대피물질을 지정수량 이상 취급하는 사업장은 인근 지역주민에게 취급하는 유해화학물질의 유해성정보 및 화학사고 위험성, 화학사고 발생 시 대기·수질·지하수·토양·자연환경 등의 영향 범위, 화학사고 발생 시 조기경보 전달방법, 주민대피, 행동요령 등의 정보를 알기 쉽게 매년 1회 이상 고지해야할 의무가 있으므로 기상조건에 따른 영향범위 변화는 대형 화학사고 발생 시 기준에 고지 받은 주민에게만 국한되는 것이 아

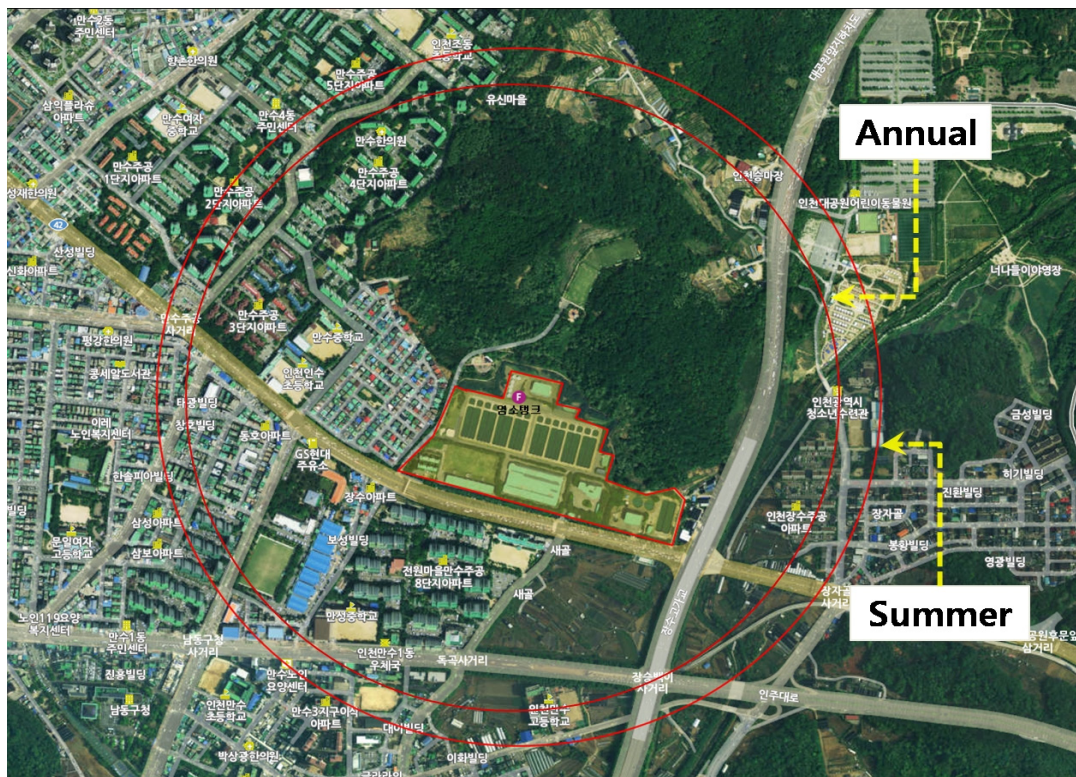


Fig. 2. Influence range of alternative scenario(KORA).

나라 기존의 시나리오 상 영향범위 밖에 있어 고지 받지 못한 주민들에게도 영향을 미칠 수 있기 때문에 더 큰 피해가 발생할 수 있다[9]. 따라서 기존 대안의 시나리오 영향범위가 포괄할 수 없는 부분에 대한 개선이 있어야 한다. 화학물질의 독성, 폭발성 등의 특징에 따라 서로 다른 위험성평가 방법을 개선함으로써 대안의 시나리오 정의에 맞게 더 현실적인 사고시나리오를 설정하여야 한다. 더불어서 화학물질관리법 제48조(화학물질 종합정보시스템 구축·운영)에 따라 화학물질의 안전관리, 화학사고 발생 이력 및 화학사고 대비·대응 등과 관련된 정보를 수집·보급하여야 한다. 현재 정부에서는 화학물질사고대응정보시스템(CARIS)을 화학사고 및 테러에 대응하기 위해 개발하였으며 소방, 경찰, 군, 지자체 등 522개 대응기관에 배포하여 운영 중이다[10]. 화학사고를 예방하고 피해의 최소화를 대비하기 위해서는 화학물질 종합정보시스템과 CARIS 같은 대응정보시스템을 연동하여 화학사고 정보 및 화학물질별 특성에 맞는 사고시나리오 DB 구축 등을 지향하여야 한다.

4. 결론

기존의 연평균 기상조건에 따른 사고시나리오와 여름철 기상조건에 따른 사고시나리오의 비교를 통하여 피해 영향범위 변화를 조사하고 위험성평가 발전방향을 모색하였다. 이를 바탕으로, 염소를 취급하는 인천 소재 사업장의 KORA를 활용한 정성 및 정량적 평가 결과 염소의 ERPG-2(3 ppm)에 해당하는 영향범위는 2016년 연평균 기상조건하에서 반경 712.4 m, 2016년 여름철 평균 기상조건하에서 반경 796.2 m로 증가되었다. 영향범위 내 주민 수의 변화는 2016년 연평균 기상조건하에서 20,090 명, 2016년 여름철 평균 기상조건하에서 27,143 명이었으며, 두 조건에서의 누출률은 모두 5.6 kg/sec로 나타났다. 연평균과 여름철 기상조건에 따른 영향범위 반경은 최대 83.8 m, 영향범위 내 주민 수는 최대 7,053 명의 차이가 나는 것으로 조사되었다.

이와 같은 결과는 연평균 기상자료와 다소 상이한 여름철 기상에서의 사고 시 기존 대안의 시나리오상의 영향범위가 포괄할 수 없는 부분이 존재함을 의미한다. 이러한 반례를 통해 화학물질별 특성을 고려한 Case Risk Assessment가 이루어져야 한다. 국내 현행 화학물질관

리법이 제도적인 발전을 이루고 현실적인 적용을 통해서 지속적으로 안전한 화학물질 관리제도로서 이행되기 위해, 본 연구에서 제시한 사실에 근거하여 사고시나리오를 선정하도록 개선함으로써 실제사고의 예방·대비·대응·복구과정에 상승된 효과를 기대한다.

References

- [1] Ministry of Environment, "Chemical Control Act", Ministry of Environment, 2016.
- [2] J. C. Kim, "A Study on the Full Amendment of Toxic Chemicals Control Act into Chemicals Control Act", Environmental Law Review, vol. 36, no. 2, pp. 3-42, 2014.
- [3] T. H. Lee, J. D. Park, S. J. Lee, B. S. Bang, K. P. Kim, M. S. Kim, J. S. Park, "Characteristics of Chemical Substance Accident in Korea", Korean Journal of Hazardous Materials, vol. 3, no. 1, pp. 37-41, 2015.
- [4] C. H. Shin, H. S. Lee, T. H. Kim, J. H. Park, "Analysis on Chemical Accident Characteristics of Facilities Handling Hydrochloric Acid", Fire Science and Engineering, vol. 30, no. 6, pp. 14-22, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.6.014>
- [5] S. W. Lee, "Status and Problems of Management of Hazardous Chemicals", Audit and Inspection Research Institute, 2013.
- [6] National Institute of Chemical Safety, "Technical Guidelines for the Selection of Accident Scenarios", National Institute of Chemical Safety, 2016.
- [7] Korea Occupational Safety & Health Agency, "Technical Guidelines for Leakage Source Modeling (KOSHA GUIDE P-92-2012)", Korea Occupational Safety & Health Agency, 2012.
- [8] American Petroleum Institute, "API RP 581 Risk-Based Inspection Methodology - Documenting and Demonstrating the Thinning Probability of Failure Calculations Third Edition", American Petroleum Institute, 2014.
- [9] C. H. Bae, S. T. Chung, "A Study on Awareness of Risks and Countermeasures for Chemical Accidents among Residents near Chemical Plants", Crisisonomy, vol. 13, no. 5, pp. 123-134, 2017.
- [10] K. S. Chun, S. B. Kim, C. H. Park, S. R. Ahn, "A Study on Improvement of Chemical Accident Response Information Systems", Korean Journal of Hazardous Materials, vol. 2, no. 1, pp. 38-42, 2014.

김 현 섭(hyun-Sub Kim)

[정회원]



- 2016년 1월 ~ 현재 : 시흥화학재
난합동방재센터
- 2016년 8월 : 아주대학교 환경안
전공학과 (석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국산업기
술대학교 생명화학공학과 (박사과
정)

<관심분야>

안전공학, 환경공학, 화학공학

전 병 한(Byeong-Han Jeon)

[정회원]



- 2016년 2월 : 아주대학교 환경공
학과 (석사)
- 2016년 2월 ~ 2017년 7월 : (주)
원일화학엔환경
- 2017년 8월 ~ 현재 : 고흥폐기연
구소

<관심분야>

환경공학, 안전공학